



УДК 669.187

DOI 10.17073/0368-0797-2021-2-104-111



ПРИМЕНЕНИЕ ИОННОЙ ТЕОРИИ ДЛЯ РАСЧЕТА СУЛЬФИДНОЙ ЕМКОСТИ ШЛАКОВ

А. А. Метелкин¹, О. Ю. Шешуков^{2,3}, М. В. Савельев⁴,
О. И. Шевченко¹, Д. К. Егиазарьян^{2,3}

¹ Нижнетагильский технологический институт (филиал) Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, 622031, Свердловская обл., Нижний Тагил, ул. Красногвардейская, 59)

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 28)

³ Институт металлургии УрО РАН (Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

⁴ АО «Нижнетагильский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ НТМК») (Россия, 622025, Свердловская обл., Нижний Тагил, ул. Металлургов, 1)

Аннотация. Рассмотрены вопросы удаления серы в агрегате ковш-печь. Коэффициент распределения серы зависит от сульфидной емкости шлака, коэффициента активности серы, окислительного потенциала среды и константы равновесия. Сульфидная емкость шлаков C_s является одной из важнейших характеристик рафинирующей способности шлаков, применяемых при внепечной обработке стали. Одним из факторов, влияющих на сульфидную емкость, является температура. Предложена формула, показывающая зависимость сульфидной емкости от оптической основности и температуры в интервале 1400 – 1650 °С. При оптической основности Λ не более 0,75 погрешность представленной формулы не превышает 6 %. Предложено выражение для расчета оптической основности, в котором учитывается влияние основных, кислых оксидов и амфотерного оксида Al_2O_3 . Показано, что шлаки, полностью состоящие из гомогенной фазы, обладают повышенной оптической основностью оксида алюминия. Гетерогенные шлаки обладают пониженной оптической основностью Al_2O_3 по сравнению с гомогенными шлаками. Возможно этот факт может быть объяснен тем, что в гомогенных шлаках наблюдается дефицит основного оксида CaO и при рассматриваемых условиях соединение Al_2O_3 начинает проявлять более основные свойства, чем кислотные. Таким образом, в гомогенных шлаках оптическая основность оксида алюминия повышенная и приближается к оптической основности оксида CaO. Расчеты, осуществленные на реальных плавках, показывают, что при увеличении содержания оксида Al_2O_3 в шлаке его оптическая основность снижается. Известное значение оптической основности позволяет определить сульфидную емкость шлака, коэффициент распределения серы между металлом и шлаком и, соответственно, конечное содержание серы в металле. Проведенные расчеты показывают, что для определения сульфидной емкости целесообразно применять ионную теорию шлаков.

Ключевые слова: десульфурация металла, агрегат ковш-печь, оптическая основность, сульфидная емкость

Для цитирования: Метелкин А.А., Шешуков О.Ю., Савельев М.В., Шевченко О.И., Егиазарьян Д.К. Применение ионной теории для расчета сульфидной емкости шлаков // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 2. С. 104–111. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-2-104-111>

APPLICATION OF IONIC THEORY TO CALCULATE SULFIDE CAPACITY OF SLAGS

A. A. Metelkin¹, O. Yu. Sheshukov^{2,3}, M. V. Savel'ev⁴,
O. I. Shevchenko¹, D. K. Egiazar'yan^{2,3}

¹ Nizhny Tagil Technological Institute (branch). Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin (59 Krasnogvardeiskaya str., Nizhny Tagil, Sverdlovsk Region 622031, Russian Federation)

² Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin (28 Mira str., Yekaterinburg 620002, Russian Federation)

³ Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science (UB RAS) (101 Amundsena str., Yekaterinburg 620016, Russian Federation)

⁴ JSC "Nizhny Tagil Iron and Steel Works" (1 Metallurgov str., Nizhny Tagil, Sverdlovsk Region 622005, Russian Federation)

Abstract. The article considers the issues of sulfur removal in the ladle-furnace unit. The sulfur distribution coefficient depends on sulfide capacity of the slag, sulfur activity coefficient, oxidizing potential of the medium and equilibrium constant. The sulfide capacity C_s of slags is one of the most important characteristics of refining capacity of the slags used in extra-furnace steel processing. One of the factors affecting the sulfide capacity is temperature. The formula was proposed showing the dependence of sulfide capacity on the optical basicity and temperature, in the temperature range of 1650 – 1400 °C and when the optical basicity Λ is not more than 0.75; the error of the presented formula does not exceed 6 %. The formula for calculating the optical basicity is proposed, which takes into account the influence of basic, acidic oxides and amphoteric oxide Al_2O_3 . It is shown that slags, completely consisting of a homogeneous phase, have an increased optical basicity of aluminum oxide. Heterogeneous slags have a reduced optical basicity of Al_2O_3 in comparison with homogeneous slags. Perhaps, this fact can be explained by the fact that in homogeneous slags there is a deficiency of the basic oxide CaO and in the conditions under consideration Al_2O_3 compound begins to exhibit more basic properties than acidic

ones, thus, in homogeneous slags, the optical basicity of aluminum oxide is increased and approaches optical basicity of CaO oxide. Calculations carried out on the basis of real heats have shown that with an increase in the content of Al_2O_3 oxide in the slag, its optical basicity decreases. Known value of the optical basicity makes it possible to determine sulfide capacity of the slag, sulfur distribution coefficient between metal and slag, and, accordingly, final sulfur content in the metal. The research results have shown that it is advisable to apply the ionic theory of slags for the sulfide capacity determination.

Keywords: metal desulfurization, ladle-furnace unit, optical basicity, sulfide capacity

For citation: Metelkin A.A., Sheshukov O.Yu., Savel'ev M.V., Shevchenko O.I., Egiazar'yan D.K. Application of ionic theory to calculate sulfide capacity of slags. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 2, pp. 104–111. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-2-104-111>

ВВЕДЕНИЕ

Одной из главных задач современной металлургии является получение требуемых свойств металла при минимальных затратах на его производство.

Для получения требуемых параметров стали необходимо многостадийное производство, включающее следующее [1]:

- предварительное рафинирование (удаление серы из чугуна);
- основное рафинирование (окисление примесей в сталеплавильном агрегате);
- дополнительное рафинирование (удаление серы в агрегате ковш-печь (АКП) путем перевода ее в шлак);
- дегазация (удаление растворенных в металле газов).

Ковшовая металлургия является одной из последних стадий, основной задачей которой является доводка жидкого металла до заданного и однородного химического состава, необходимой температуры, высокой степени чистоты по неметаллическим включениям и вредным примесям [1 – 5].

Одной из примесей, снижающей служебные свойства стали, является сера, поэтому решение вопроса об ее удалении из металла является важной практической задачей [1, 2, 6 – 16].

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью настоящей работы является изучение процессов удаления серы в агрегате ковш-печь.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МАТЕРИАЛЫ

Известно, что коэффициент распределения серы между металлом и шлаком определяется по следующей формуле [17]:

$$L_S = \frac{(S)}{[S]} = C_S \gamma_{[S]} \frac{1}{p_{[O_2]}^2} \frac{1}{K_{[S]}}, \quad (1)$$

где C_S – сульфидная емкость шлака; $\gamma_{[S]}$ – коэффициент активности серы в металле; $p_{[O_2]}^2$ – окислительный потенциал среды; $K_{[S]}$ – константа равновесия реакции распределения серы между металлом и шлаком.

Коэффициент активности серы в металле, окислительный потенциал среды, константа равновесия реакции распределения серы между металлом и шлаком являются достаточно изученными и представлены в работах [1, 18 – 21].

Сульфидная емкость шлаков C_S является одной из важнейших характеристик рафинирующей способности шлаков, применяемых при внепечной обработке стали. Эта величина определяется как функция f от температуры и состава шлака, то есть это величина экспериментально определяемая и термодинамически оцениваемая [17].

Одним из факторов, влияющих на сульфидную емкость, является температура.

В работе [22] было изучено, как температура влияет на изменение сульфидной емкости от оптической основности (рис. 1).

По данным работы [20] сульфидная емкость шлака при любой температуре в интервале 1400 – 1700 °С может быть определена по следующему выражению:

$$\lg C_S = \frac{22\,690 - 54\,640\Lambda}{T} + 43,6\Lambda - 25,2. \quad (2)$$

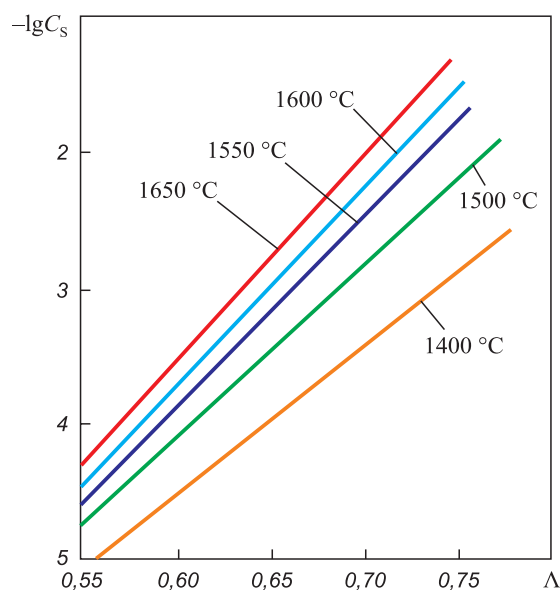


Рис. 1. Зависимость сульфидной емкости $\lg C_S$ от оптической основности при разных температурах

Fig. 1. Dependence of $\lg C_S$ sulfide capacity on optical basicity at different temperatures

При расчетах коэффициента распределения серы было определено, что погрешность формулы (2) по отношению к графикам (рис. 1) составляет более 15 %, поэтому использование этой формулы для точных теоретических расчетов затруднительно.

Математически графики (рис. 1) могут быть описаны уравнением [23]:

$$\lg C_s = 14,3\Lambda - 7,01 - \frac{9908,1}{T}. \quad (3)$$

В интервале температур 1400 – 1650 °С и при оптической основности Λ не более 0,75 погрешность представленной формулы не превышает 6 %.

В качестве критерия основности оксидных расплавов наиболее часто используют оптическую основность, которая характеризуется как способность анионов кислорода, присутствующих в шлаке, отдавать свои электроны ионам-акцепторам (зондовым ионам) [24]. Для систем, состоящих из чистых оксидов, оптическая основность Λ связана с электроотрицательностью элементов по Полингу (X_i) следующим соотношением [24]:

$$\Lambda_i = \frac{1}{1,36(X_i - 0,26)}. \quad (4)$$

В более ранних работах было определено, что для систем, состоящих из чистых оксидов, оптическая основность связана с электроотрицательностью катиона по Полингу (X_i) выражением [22]:

$$\Lambda_i = \frac{0,75}{X_i - 0,25}. \quad (5)$$

Применение уравнений (4) и (5) позволяет найти оптическую основность для любых многокомпонентных систем, состоящих из непереходных (неамфотерных) металлов, по следующему соотношению [23, 24]:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^n (X_i \Lambda_i) = X_{MeO_1} \Lambda_{MeO_1} + X_{MeO_2} \Lambda_{MeO_2} + \dots + X_{MeO_n} \Lambda_{MeO_n}, \quad (6)$$

где X_i – эквивалентная доля анионов, вносимых данным компонентом; Λ_i – оптическая основность компонента системы.

Оптическая основность характеризуется способностью анионов кислорода отдавать свои электроны ионам-акцепторам [24]. С позиции ионного строения шлаков основностью принято считать наличие «свободных» анионов кислорода. В обоих случаях основность шлака определяется наличием «свободных» анионов кислорода или их активностью в расплавленных оксидах [24 – 26].

По данным работ [18, 24, 26] оксидный расплав можно представить как упаковку анионов кислорода (O^{2-}), между которыми расположены остальные компо-

ненты расплава: катионы Ca^{2+} , Mg^{2+} , SiO_4^{4-} , Al^{3+} и др. Катионы значительно отличаются друг от друга силой электростатического поля.

Катионы кислых оксидов (Si^{4+} , P^{5+} , B^{3+}) обладают наибольшей силой электрического поля (меньшим радиусом при большем заряде), поэтому интенсивнее притягивают к себе отрицательно заряженные ионы кислорода O^{2-} , образуя комплексные анионы типа SiO_4^{4-} . Находящиеся в рассматриваемых комплексах анионы кислорода не принимают участия в химических реакциях, тем самым снижается рафинировочная способность шлака [26].

Катионы металлов Ca^{2+} , Mg^{2+} , не обладающие большой электростатической силой (большой радиус при меньшем заряде), не способны сформировать стабильные комплексные анионы, поэтому ввод в шлак основных оксидов приводит к увеличению содержания «свободных» анионов кислорода и увеличению рафинировочных свойств шлака.

Катионы Al^{3+} , обладающие электростатическим полем средней силы, могут проявлять как основные, так и кислотные свойства в зависимости от состава шлака.

Учитывая ионную природу строения металлургических шлаков, рассчитаем оптическую основность по формуле:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^n (X_i Y_i)_{осн} - \sum_{i=1}^n (X_i Y_i)_{кис} + X_{Al_2O_3} Y_{Al_2O_3}; \quad (7)$$

здесь X_i – эквивалентная доля анионов, вносимых данным компонентом; Y_i – параметр взаимодействия рассматриваемого оксида, связанный с электроотрицательностью элементов по Полингу; $Y_{Al_2O_3}$ – параметр взаимодействия оксида Al_2O_3 .

В предлагаемой формуле учитывается влияние основных и кислых оксидов, а также присутствие оксида Al_2O_3 .

Для основных и кислых оксидов оптическая основность определена, также она известна и для амфотерных оксидов. Однако, как было показано в работе [25], оксид Al_2O_3 может проявлять как основные, так и кислотные свойства, то есть соответственно будет изменяться и оптическая основность в зависимости от состава шлака.

Для расчета рационального состава шлака, наводимого в АКП, необходимо изучить изменение свойств соединения Al_2O_3 .

В сталеразливочном ковше при обработке в АКП наводят жидкоподвижные высокоосновные шлаки следующего химического состава [25]: 45,0 – 61,9 (54,0) % CaO ; 10,0 – 30,2 (22,1) % SiO_2 ; 1,8 – 29,6 (13,5) % Al_2O_3 ; 2,1 – 9,8 (7,3) % MgO ; менее 1,0 % FeO ; менее 1,0 % MnO (в скобках указано среднее значение).

Для определения параметра взаимодействия $Y_{Al_2O_3}$ были проанализированы плавки в АКП, для каждой отобранной плавки рассчитаны:

- $L_{S_{\text{прак}}}$ – фактический коэффициент распределения серы в металле;
- $\gamma_{[S]}$ – коэффициент активности серы в металле;
- $p_{[O_2]}^{\frac{1}{2}}$ – окислительный потенциал среды;
- $K_{[S]}$ – константа равновесия реакции распределения серы между металлом и шлаком;
- C_S – сульфидная емкость шлака (рассчитывали таким образом, чтобы $L_{S_{\text{прак}}} = L_{S_{\text{теор}}}$ за счет изменения параметра взаимодействия $Y_{Al_2O_3}$).

Расчетные и реальные показатели представлены в таблице.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Из данных, представленных на рис. 2, видно, что в шлаках, полностью состоящих только из гомогенной фазы, параметр взаимодействия $Y_{Al_2O_3}$ показывает повышенные значения. В гетерогенных шлаках параметр взаимодействия $Y_{Al_2O_3}$ ниже, чем в гомогенных шлаках. Это можно объяснить тем, что в гомогенных шлаках присутствует дефицит основного оксида CaO (основной источник «свободных» анионов кислорода), и в рассматриваемых условиях оксид Al_2O_3 начинает проявлять более основные свойства, чем кислотные. Таким образом, в гомогенных шлаках параметр взаимодействия оксида алюминия повышенный.

Также необходимо отметить, что при повышении содержания оксида Al_2O_3 в шлаке его параметр взаимодействия $Y_{Al_2O_3}$ снижается и при его концентрации в шлаке более 30 % этот оксид проявляет кислотные свойства, что хорошо согласуется с результатами лабораторных исследований [25].

Учитывая значительное расхождение в рафинирующих свойствах рассматриваемых шлаков, необ-

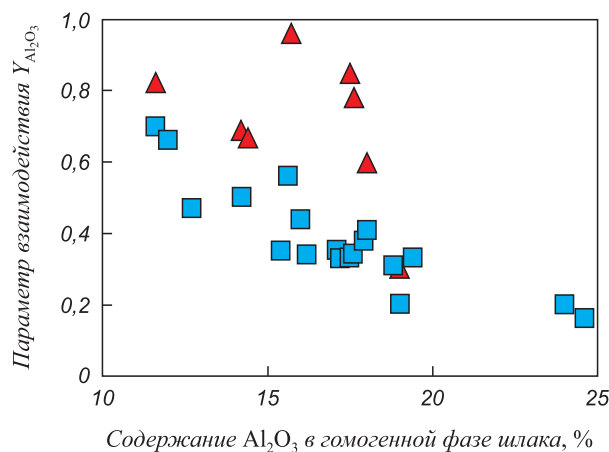


Рис. 2. Зависимость параметра взаимодействия $Y_{Al_2O_3}$ от типа шлака и содержания в нем оксида Al_2O_3 :

▲ – гомогенный шлак, ■ – гетерогенный шлак

Fig. 2. Dependence of $Y_{Al_2O_3}$ interaction parameter on the slag type and content of oxide Al_2O_3 in it:

▲ – homogeneous slag, ■ – heterogeneous slag

ходимо изучить изменение параметра взаимодействия $Y_{Al_2O_3}$ для гомогенных и гетерогенных шлаков отдельно.

Оптическая основность $\Lambda_{Al_2O_3}$ гетерогенных шлаков по расчетам представлена на рис. 3.

С увеличением содержания оксида Al_2O_3 в шлаке снижается параметр взаимодействия $Y_{Al_2O_3}$, который может быть определен следующим выражением:

$$Y_{Al_2O_3}^{\text{гетеро}^*} = -0,0365(Al_2O_3) + 1,013, \quad (8)$$

где (Al_2O_3) – содержание оксида в гомогенной составляющей металлургического шлака.

Оптическая основность гетерогенных шлаков, наводимых в сталеразливочном ковше в АКП, может быть определена следующим выражением:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^n (X_i Y_i)_{\text{осн}} - \sum_{i=1}^n (X_i Y_i)_{\text{кис}} + X_{Al_2O_3} (-0,0365(Al_2O_3) + 1,013). \quad (9)$$

Данные по расчетам параметра взаимодействия $Y_{Al_2O_3}$ гомогенных шлаков представлены на рис. 4.

По данным работы [25] известно, что при содержании оксида Al_2O_3 до 16 % в шлаке он проявляет основные свойства, поэтому для рассматриваемых условий принимаем максимальные (0,8) значения параметра взаимодействия $Y_{Al_2O_3}$ (рис. 4). Тогда общая оптическая основность шлакового расплава, при данных условиях, будет определяться для гомогенных шлаков формулами:

$$\Lambda_{\text{гомо}}^{*0-16} = \sum_{i=1}^n (X_i Y_i)_{\text{осн}} - \sum_{i=1}^n (X_i Y_i)_{\text{кис}} + 0,8 X_{Al_2O_3}; \quad (10)$$

$$Y_{Al_2O_3}^{\text{гомо}} = -0,0069(Al_2O_3)^2 + 0,2175(Al_2O_3) - 0,9338; \quad (11)$$

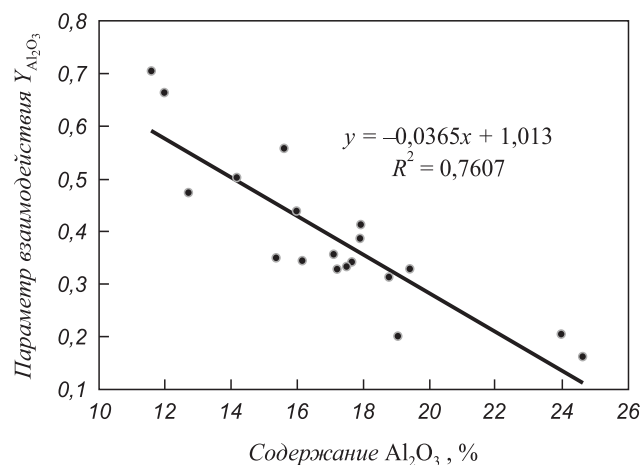


Рис. 3. Зависимость параметра взаимодействия $Y_{Al_2O_3}$ в гомогенной составляющей гетерогенного шлака

Fig. 3. Dependence of $Y_{Al_2O_3}$ interaction parameter in the homogeneous component of heterogeneous slag

Расчетные и реальные показатели с отобранных плавок

Calculated and real indicators of selected heats

Плавка	$L_{S_{\text{факт}}}$	$L_{S_{\text{расч}}}$	$C_s \cdot 10^{-5}$	$\gamma_{[S]}$	$K_{[S]}$	$p_{O_2} \cdot 10^{-8}$	$\Lambda_{Al_2O_3}^{\text{гомо}}$	$\Lambda_{Al_2O_3}^{\text{гетеро}}$	CaO, %	Al_2O_3 , %	SiO_2 , %	MgO, %	CaO(ТВ), %	MgO(ТВ), %
1	19,07	20,2	44,09	1,17	367,5	6,94	–	0,16	54,1	24,6	14,3	6,0	13,6	–
2	137,9	138,49	31,92	1,02	367,5	2,92	0,85	–	54,5	18,3	19,7	9,0	–	–
3	27,53	32,82	36,66	1,02	372,2	2,66	–	0,34	54,0	16,2	19,1	8,6	10,9	–
4	28,04	28,72	27,59	1,06	360,2	3,75	–	0,44	54,0	16,0	19,8	9,3	11,0	1,0
5	12,00	13,15	15,62	1,01	358,4	5,91	–	0,33	53,7	17,2	19,2	8,0	6,8	–
6	22,68	22,79	9,99	1,03	364,7	3,03	0,82	–	54,9	14,4	24,0	6,1	–	–
7	60,95	61,08	35,51	1,02	365,7	3,04	0,60	–	52,7	19,0	18,8	8,5	–	–
8	30,86	31,09	21,23	1,02	360,2	3,39	0,96	–	51,8	16,3	23,5	8,6	–	–
9	20,05	20,18	12,62	1,06	389,7	2,11	–	0,20	51,9	19,0	18,0	8,9	12,1	2,7
10	11,11	11,88	52,38	1,05	390,7	2,27	–	0,50	50,3	14,2	22,4	11,2	–	4,0
11	26,32	34,89	43,41	1,06	374,1	2,89	–	0,38	55,2	17,9	19,0	6,8	11,8	4,0
12	25,23	29,49	23,00	1,06	390,7	1,96	–	0,34	52,6	17,6	19,1	8,9	8,5	4,6
13	16,33	18,80	24,42	1,06	394,8	1,80	–	0,47	51,4	12,7	21,6	8,8	18,0	6,1
14	30,78	31,65	41,96	1,17	366,6	5,28	–	0,20	54,6	24,0	14,7	5,8	14,4	–
15	43,61	44,62	25,34	1,05	372,2	2,76	0,67	–	53,6	15,7	20,8	8,5	–	–
16	40,39	40,52	29,25	1,03	365,7	3,01	–	0,33	55,7	19,4	18,0	6,4	10,0	–
17	23,31	27,34	41,48	1,05	390,7	2,27	–	0,31	52,5	18,8	18,4	8,9	5,0	–
18	18,92	20,51	28,67	1,06	357,5	3,52	–	0,35	53,4	15,4	20,1	9,2	9,6	–
19	37,12	40,15	25,30	1,05	365,7	3,00	–	0,56	53,1	15,6	20,0	9,1	14,9	1,4
20	34,67	37,68	44,09	1,05	392,8	1,80	–	0,35	56,7	17,1	19,7	4,1	7,3	–
21	28,74	30,6	31,92	1,06	370,3	2,73	–	0,33	55,1	17,5	19,2	6,8	11,7	–
22	35,92	37,59	36,66	1,06	363,8	3,21	–	0,41	53,2	18,0	18,6	9,2	13,7	0,3
23	38,25	38,25	27,59	1,02	358,4	3,51	0,69	–	53,9	15,7	21,1	7,8	–	–
24	20,16	21,45	15,62	1,01	366,6	2,98	0,78	–	51,1	18,5	22,6	6,1	–	–
25	13,77	14,52	9,99	1,01	364,7	5,48	–	0,70	56,6	11,6	23,2	6,8	9,8	–
26	24,33	25,94	35,51	1,05	373,1	2,74	–	0,66	56,4	12,0	23,1	6,8	10,9	–
27	23,00	26,35	21,23	1,05	378,9	2,38	0,30	–	51,7	24,4	16,8	5,9	–	–

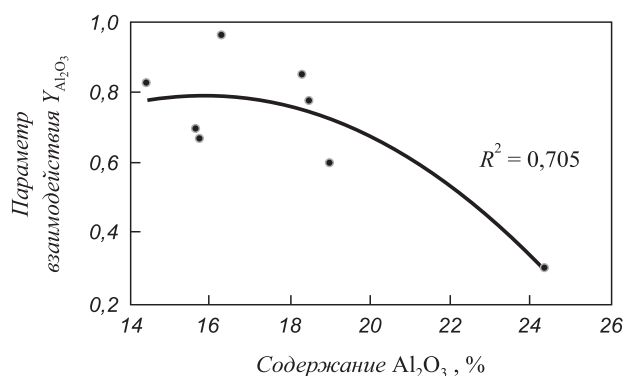


Рис. 4. Зависимость параметра взаимодействия $Y_{Al_2O_3}$ от содержания глинозема в гомогенном шлаке

Fig. 4. Dependence of $Y_{Al_2O_3}$ interaction parameter change on the content of alumina in homogeneous slag

$$\Lambda_{\text{гомо}}^{*16-36} = \sum_{i=1}^n (X_i Y_i)_{\text{осн}} - \sum_{i=1}^n (X_i Y_i)_{\text{кис}} + X_{Al_2O_3} \left(-0,0069(Al_2O_3)^2 + 0,2175(Al_2O_3) - 0,9338 \right); \quad (12)$$

$$\Lambda_{\text{гомо}}^{*36} = \sum_{i=1}^n (X_i Y_i)_{\text{осн}} - \sum_{i=1}^n (X_i Y_i)_{\text{кис}} - X_{Al_2O_3}. \quad (13)$$

Зависимость (10) – при содержании Al_2O_3 до 16 %; (11), (12) – при содержании Al_2O_3 в интервале 16 – 36 %; (13) – при содержании Al_2O_3 более 36 %.

Если содержание оксида Al_2O_3 в шлаке более 16 %, тогда он начинает ослаблять основные свойства. При содержании в шлаке соединения Al_2O_3 в интервале от 16 до 36 % параметр взаимодействия $Y_{Al_2O_3}$ рассматриваемого оксида будет изменяться по формуле (11) и общая оптическая основность шлакового расплава при таких условиях будет определяться по формуле (10).

При содержании в шлаке оксида Al_2O_3 более 36 % этот оксид будет проявлять только кислотные свойства и общая оптическая основность будет определяться по формуле (13), однако для более точных расчетов формула требует уточнения.

Уравнения (9) – (13) позволяют определить оптическую основность шлака, наводимого в АКП, и рассчитать его рациональный состав, необходимый для проведения рафинировочных процессов.

Выводы

Теоретические расчеты, проведенные на реальных плавках, показывают, что для определения сульфидной емкости целесообразно применять ионную теорию шлаков. Определено изменение оптической основности $\Lambda_{Al_2O_3}$ при различном составе шлака. Известное значение оптической основности позволяет определить сульфидную емкость шлака, коэффициент распределения серы между металлом и шлаком и, соответственно, конечное содержание серы в металле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Бигеев А.М., Бигеев В.А. *Металлургия стали. Теория и технология плавки стали*. Магнитогорск: МГТУ, 2000. 544 с.
2. *Металлургия стали* / В.И. Явойский, Ю.В. Кряковский, В.П. Григорьев, Ю.М. Нечкин, В.Ф. Кравченко, Д.И. Бородин. М.: *Металлургия*, 1983. 584 с.
3. Кньюппель Г. *Раскисление и вакуумная обработка стали. Основы и технология ковшовой металлургии*. М.: *Металлургия*, 1984. 414 с.
4. Fandrich R., Lungen H., Wuppermann C. Actual review on secondary metallurgy // *Revue de Metallurgie. Cahiers D'Informations Techniques*. 2008. Vol. 7-8. No. 105. P. 364–374. <http://doi.org/10.1051/metal:2008053>
5. Fandrich R., Lungen H.B., Wuppermann C. Secondary metallurgy – State of the art and research trends in Germany // *Stahl und Eisen*. 2008. Vol. 128. No. 2. P. 45–53.
6. Turkdogan E.T. Ladle deoxidation, desulphurisation and inclusions in steel – 1. Fundamentals // *Archiv für das Eisenhüttenwesen*. 1983. Vol. 1. No. 54. P. 1–10. <http://doi.org/10.1002/srin.19830519>
7. Pluschkell W. Metallurgical reaction techniques for adjusting very low contents of C, P, S and N in steel // *Stahl und Eisen*. 1990. Vol. 5. No. 110. P. 61–70.
8. Jonsson L., Sichen D., Jönsson P. A new approach to model sulphur refining in a gas-stirred ladle – A coupled CFD and thermodynamic model // *ISIJ International*. 1998. Vol. 3. No. 38. P. 260–267. <http://doi.org/10.2355/isijinternational.38.260>
9. Cao Q., Pitts A., Nastac L. Numerical modelling of fluid flow and desulphurisation kinetics in an argon-stirred ladle furnace // *Ironmaking and Steelmaking*. 2018. Vol. 45. No. 3. P. 280–287. <http://doi.org/10.1080/03019233.2016.1262574>
1. Bigeev A.M., Bigeev V.A. *Steel Metallurgy. Theory and Technology of Steel Melting*. Magnitogorsk: MSTU, 2000, 544 p. (In Russ.).
2. Yavoiskii V.I., Kryakovskii Yu.V., Grigor'ev V.P., Nechkin Yu.M., Kravchenko V.F., Borodin D.I. *Steel Metallurgy*. Moscow: Metallurgiya, 1983, 584 p. (In Russ.).
3. Knyuppel' G. *Deoxidation and Vacuum Treatment of Steel. Basics and Technology of Ladle Metallurgy*. Moscow: Metallurgiya, 1984, 414 p. (In Russ.).
4. Fandrich R., Lungen H., Wuppermann C. Actual review on secondary metallurgy. *Revue de Metallurgie. Cahiers D'Informations Techniques*. 2008, vol. 7-8. no. 105, pp. 364–374. <http://doi.org/10.1051/metal:2008053>
5. Fandrich R., Lungen H.B., Wuppermann C. Secondary metallurgy – State of the art and research trends in Germany. *Stahl und Eisen*. 2008, vol. 128, no. 2, pp. 45–53.
6. Turkdogan E.T. Ladle deoxidation, desulphurisation and inclusions in steel – 1. Fundamentals. *Archiv für das Eisenhüttenwesen*. 1983, vol. 1, no. 54, pp. 1–10. <http://doi.org/10.1002/srin.19830519>
7. Pluschkell W. Metallurgical reaction techniques for adjusting very low contents of C, P, S and N in steel. *Stahl und Eisen*. 1990, vol. 5, no. 110, pp. 61–70. (In Germ.).
8. Jonsson L., Sichen D., Jönsson P. A new approach to model sulphur refining in a gas-stirred ladle – A coupled CFD and thermodynamic model. *ISIJ International*. 1998, vol. 3, no. 38, pp. 260–267. <http://doi.org/10.2355/isijinternational.38.260>
9. Cao Q., Pitts A., Nastac L. Numerical modelling of fluid flow and desulphurisation kinetics in an argon-stirred ladle furnace. *Ironmaking and Steelmaking*. 2018, vol. 45, no. 3, pp. 280–287. <http://doi.org/10.1080/03019233.2016.1262574>

10. Shen C., Liping W., Junbo G., Yuanwang P., Fei H. Industrial investigation of decarburization and desulphurization behaviour of 120 t new single snorkel degasser // *Ironmaking and Steelmaking*. 2020. Vol. 47. No. 7. P. 713–721. <http://doi.org/10.1080/03019233.2019.1580029>
11. Agapitov E.B., Lemesheko M.A., Sokolova M.S. Prospects for the use of hollow electrodes for deep desulfurization of steel in the ladle-furnace unit // *Materials Science Forum*. 2020. No. 989 MSF. P. 474–479. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.989.474>
12. Komolova O.A., Grigorovich K.V. Development of LF-software for modeling of refining processes in a ladle-furnace // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1. No. 1347. Article 012066. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1347/1/012066>
13. Lin L., Hou Z.-X., Bao Y.-P., Wu Y.-X., Zhang L.-Q., Zeng J.-Q. Gasification desulfurization and resource utilization of ladle furnace refining slag [LF精炼渣的气化脱硫及资源化利用] // *Chinese Journal of Engineering*. 2018. No. 40. P. 154–160. <http://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2018.s1.022>
14. Socha L., Hudzieczek Z., Michalek K., Pilka V., Piegza Z. Verification of physical modelling of steel desulphurization in the plant conditions of the homogenization station. In: *METAL 2014 – 23rd International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. 2014. P. 64–71.
15. Socha L., Bažan J., Gryc K., Morávka J., Styrnal P., Pilka V., Piegza Z. Optimisation of the slag mode in the ladle during the steel processing of secondary metallurgy // *Materiali in Tehnologije*. 2013. Vol. 5. No. 47. P. 673–678.
16. Adriana P., Teodor H., Lucia V., Vasile P. Research on desulphurization of steel with calcium aluminate synthetic slag with addition of titanium oxide. In: *International Conference on Manufacturing Engineering, Quality and Production Systems, MEQAPS – Proceedings*. 2011. P. 147–151.
17. Бурмасов С.П., Гудов А.Г., Ярошенко Ю.Г., Мелинг В.В., Дресвякина Л.Е. Анализ массообменных процессов при ковшем рафинировании стали в условиях газового перемешивания // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2015. Т. 58. № 9. С. 638–644. <http://doi.org/10.17073/0368-0797-2015-9-638-644>
18. Попель С.И., Сотников А.И., Бороненков В.Н. Теория металлургических процессов. М.: Металлургия, 1986. 463 с.
19. Казачков Е.А. Расчеты по теории металлургических процессов. М.: Металлургия, 1988. 288 с.
20. Итоги науки и техники. Теория металлургических процессов. М.: «ВИНИТИ», 1987. 208 с.
21. Коровин В.А., Леушин О.И., Палавин Р.Н., Колганов В.Н., Черкасов С.В., Костромин С.В. Внепечная обработка и качество металла // *Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация»*. 2009. № 8. С. 13–15.
22. Соммервилль И.Д. Измерение, прогноз и применение емкостей металлургических шлаков / Пер. с англ. В кн.: *Инжекционная металлургия '86*. М.: Металлургия, 1990. С. 107–120.
23. Метелкин А.А., Шешуков О.Ю., Савельев М.В., Шевченко О.И., Егиазарьян Д.К. К вопросу о десульфурации стали в агрегате «ковш-печь». В кн.: *Международная научная конференция «Физико-химические основы металлургических процессов» имени академика А.М. Самарина*. М.: ИМЕТ РАН, 2019. 128 с.
24. Новиков В.К., Невидимов В.Н. Полимерная природа расплавленных шлаков. Екатеринбург: изд. ВПО УГТУ – УПИ, 2006. 62 с.
25. Вопросы утилизации рафинировочных шлаков сталеплавильного производства / О.Ю. Шешуков, М.А. Михеенков, И.В. Некрасов, Д.К. Егиазарьян, А.А. Метелкин, О.И. Шевченко. Нижний Тагил: изд. НТИ (филиал) УрФУ, 2017. 208 с.
26. Шешуков О.Ю., Некрасов И.В., Бонарь С.Н., Егиазарьян Д.К., Цымбалист М.М., Сивцов А.В. Сульфидная емкость глиноземистых шлаков внепечной обработки стали и активность анионов кислорода // *Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация»*. 2017. № 2. С. 30–33.
10. Shen C., Liping W., Junbo G., Yuanwang P., Fei H. Industrial investigation of decarburization and desulphurization behaviour of 120 t new single snorkel degasser. *Ironmaking and Steelmaking*. 2020. vol. 47, no. 7, pp. 713–721. <http://doi.org/10.1080/03019233.2019.1580029>
11. Agapitov E.B., Lemesheko M.A., Sokolova M.S. Prospects for the use of hollow electrodes for deep desulfurization of steel in the ladle-furnace unit. *Materials Science Forum*. 2020, no. 989 MSF, pp. 474–479. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.989.474>
12. Komolova O.A., Grigorovich K.V. Development of LF-software for modeling of refining processes in a ladle-furnace. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019, vol. 1, no. 1347, article 012066. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1347/1/012066>
13. Lin L., Hou Z.-X., Bao Y.-P., Wu Y.-X., Zhang L.-Q., Zeng J.-Q. Gasification desulfurization and resource utilization of ladle furnace refining slag [LF精炼渣的气化脱硫及资源化利用]. *Chinese Journal of Engineering*. 2018, no. 40, pp. 154–160. <http://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2018.s1.022>
14. Socha L., Hudzieczek Z., Michalek K., Pilka V., Piegza Z. Verification of physical modelling of steel desulphurization in the plant conditions of the homogenization station. In: *METAL 2014 – 23rd International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. 2014, pp. 64–71.
15. Socha L., Bažan J., Gryc K., Morávka J., Styrnal P., Pilka V., Piegza Z. Optimisation of the slag mode in the ladle during the steel processing of secondary metallurgy. *Materiali in Tehnologije*. 2013, vol. 5, no. 47, pp. 673–678.
16. Adriana P., Teodor H., Lucia V., Vasile P. Research on desulphurization of steel with calcium aluminate synthetic slag with addition of titanium oxide. In: *International Conference on Manufacturing Engineering, Quality and Production Systems, MEQAPS – Proceedings*. 2011, pp. 147–151.
17. Burmasov S.P., Gudov A.G., Yaroshenko Yu.G., Meling V.V., Dresvyakina L.E. The analysis of mass transfer in conditions of gas stirring at ladle refining of steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, vol. 58, no. 9, pp. 638–644. (In Russ.). <http://doi.org/10.17073/0368-0797-2015-9-638-644>
18. Popel' S.I., Sotnikov A.I., Boronenkov V.N. *Theory of Metallurgical Processes*. Moscow: Metallurgiya, 1986, 463 p. (In Russ.).
19. Kazachkov E.A. *Calculations to the Theory of Metallurgical Processes*. Moscow: Metallurgiya, 1988, 288 p. (In Russ.).
20. *Results of Science and Technology. Theory of Metallurgical Processes*. Moscow: VINITI, 1987, 208 p. (In Russ.).
21. Korovin V.A., Leushin O.I., Palavin R.N., Kolganov V.N., Cherkasov S.V., Kostromin S.V. Extra-furnace processing and metal quality. *Chernaya Metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2009, no. 8, pp. 13–15. (In Russ.).
22. Sommerville I.D. Measurement, forecast and application of metallurgical slag capacities. In: *Injection Metallurgy '86*. Moscow: Metallurgiya, 1990, pp. 107–120. (In Russ.).
23. Metelkin A.A., Sheshukov O.Yu., Savel'ev M.V., Shevchenko O.I., Egiazar'yan D.K. On steel desulfurization in a ladle-furnace unit. In: *International Scientific Conference "Physical and Chemical Foundations of Metallurgical Processes" named after Academician A.M. Samarin*. Moscow: IMET RAS, 2019, 128 p. (In Russ.).
24. Novikov V.K., Nevidimov V.N. *Polymer Nature of Molten Slag*. Yekaterinburg: USTU-UPI, 2006, 62 p. (In Russ.).
25. Sheshukov O.Yu., Mikheenkova M.A., Nekrasov I.V., Egiazar'yan D.K., Metelkin A.A., Shevchenko O.I. *Utilization of Refining Slag from Steelmaking Production*. Nizhnii Tagil: izd. NTI (branch) UrFU, 2017, 208 p. (In Russ.).
26. Sheshukov O.Yu., Nekrasov I.V., Bonar' S.N., Egiazar'yan D.K., Tsybalyist M.M., Sivtsov A.V. Sulfide capacity of alumina slag from extra-furnace steel processing and oxygen anions activity. *Chernaya Metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2017, no. 2, pp. 30–33. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Анатолий Алексеевич Метелкин, к.т.н., старший преподаватель кафедры металлургических технологий, Нижнетагильский технологический институт (филиал) Уральского федерального университета

E-mail: anatoliy82@list.ru

Олег Юрьевич Шешуков, д.т.н., профессор, директор Института новых материалов и технологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, главный научный сотрудник лаборатории пирометаллургии черных металлов, Институт металлургии УрО РАН

E-mail: o.j.sheshukov@urfu.ru

Максим Владимирович Савельев, начальник отдела перспективного развития, АО «Нижнетагильский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ НТМК»)

Олег Игоревич Шевченко, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой металлургических технологий, Нижнетагильский технологический институт (филиал) Уральского федерального университета

E-mail: Shevchenko-OI@ntiustu.ru

Денис Константинович Егiazар'ян, к.т.н., доцент кафедры металлургии железа и сплавов, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, старший научный сотрудник, Институт металлургии УрО РАН

ORCID: 0000-0002-9833-7191

E-mail: avari@mail.ru

Anatolii A. Metelkin, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Metallurgical Technology, Nizhny Tagil Technological Institute (branch), Ural Federal University

E-mail: anatoliy82@list.ru

Oleg Yu. Sheshukov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of the Institute of New Materials and Technologies, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Chief Researcher of the Laboratory "Pyrometallurgy of Ferrous Metals", Institute of Metallurgy, UB RAS

E-mail: o.j.sheshukov@urfu.ru

Maksim V. Savel'ev, Head of Prospective Development Department, JSC "Nizhny Tagil Iron and Steel Works"

Oleg I. Shevchenko, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair of Metallurgical Technology, Nizhny Tagil Technological Institute (branch), Ural Federal University

E-mail: Shevchenko-OI@ntiustu.ru

Denis K. Egiazar'yan, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Metallurgy of Iron and Alloys", Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Senior Researcher, Institute of Metallurgy, UB RAS

ORCID: 0000-0002-9833-7191

E-mail: avari@mail.ru

Поступила в редакцию 27.10.2020

После доработки 09.11.2020

Принята к публикации 04.12.2020

Received 27.10.2020

Revised 09.11.2020

Accepted 04.12.2020